

牟灵泉 编著 赵鸿佐 审校

941 / 145

40376

地道风降温 计算与应用

中国建筑工业出版社

地 道 风 降 温

计 算 与 应 用

牟 灵 泉 编 著
赵 鸿 佐 审 校

中国建筑工程出版社

地道风降温是我国近十几年来发展起来的新技术，具有系统简单、节省能量和投资的突出优点。

本书着重阐述了地层温度的变化特点及空气通过地道的冷却过程；编制了适合地道风降温工程设计使用的简明计算图表；介绍了应用地道风降温中的各项技术问题；并附有地道风降温工程的实例。本书可供从事建筑工程、地道风降温工作的专业工作人员及采暖通风专业工作人员参考。

地 道 风 降 温 计算与应用

牟灵泉 编著

赵鸿佐 审校

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：787×1092毫米 1/32 印张：5½ 插页：1 字数：123 千字

1982年4月第一版 1982年4月第一次印刷

印数：1—4,200册 定价：0.65元

统一书号：15040·4195

前 言

地道风降温因系统简单、节省能量和投资的突出优点而受到人们的重视。地道风降温工程的设计与计算，主要涉及地层温度及空气流经地道时的温湿度变化问题，及应用地道风降温的特点和注意问题。本书的主要目的就是论述地道风降温的换热过程，分析地道风降温的特点；从设计工作的需要出发，编制了简明的计算图表；对应用中需注意的问题进行阐述和分析，并力求作到原理简明、实用方便，有利于地道风降温的推广。

在地道风降温的研究和本书的写作过程中，得到吴增菲教授、赵鸿佐副教授的指教，得到了季淑华、陈致平、李庆峰、白录江、张锡虎、吕开盛等工程师的支持与协助，在此一并表示感谢。

本书承赵鸿佐副教授审校指正。但因作者水平所限，其中尚有错误及不当之处，欢迎读者及从事地道风降温的专业工作者批评指正。

作者 牟灵泉

一九八〇年十二月

目 录

绪 论	1
第一章 地层温度的变化与计算	4
第一节 地层原始温度的变化特点	4
第二节 地层原始温度的计算公式	5
第三节 地层原始温度的衰减	7
第四节 温度波的时间延迟	10
第五节 同一计算时刻地层原始温度的变化及实用计算图	11
第六节 间歇运行时地层计算温度 $t_{0,p}$ 的计算	16
第二章 地道风降温的过程分析与计算	19
第一节 空气通过地道时的冷却过程分析及在 $i-d$ 图上的表示	19
§ 1-1 空气通过地道时的冷却	19
§ 1-2 冷却过程在 $i-d$ 图上的表示	22
第二节 传热学的基本概念	25
§ 2-1 传热方式	25
§ 2-2 温度场和温度梯度	26
§ 2-3 稳定传热的基本定律	26
第三节 地道壁面放热系数 α 的计算	28
§ 3-1 影响放热系数 α 的因素	28
§ 3-2 光滑管内受迫流动时的放热系数	28
§ 3-3 地道壁面放热系数 α 的计算	30
第四节 地道壁体不稳定传热的一般概念	34
§ 4-1 地道壁体导热过程的分析	34

§ 4-2	地道壁体导热的微分方程式	36
§ 4-3	地道壁体导热过程的单值性条件	39
§ 4-4	恒热流作用下半无限大物体的不稳定 传热过程分析	41
§ 4-5	无限长圆柱体的传热计算	44
第五节	地道风降温工程中地道换热过程的计算	47
§ 5-1	空气流经地道时换热过程计算公式的推导	47
§ 5-2	间歇运行时空气与地道换热过程的计算	49
第六节	地道的冷却效率和冷却效率算法	57
§ 6-1	地道冷却效率的定义及计算公式	57
§ 6-2	地道冷却效率的计算	58
§ 6-3	地道冷却效率计算图及其应用	59
第七节	多进风口地道中空气冷却的特点	66
§ 7-1	多进风口地道的工况分析	66
§ 7-2	多点进风修正系数的推导	67
§ 7-3	多点进风口地道中空气冷却的计算公式	70
第八节	冬季地道风升温计算	72
§ 8-1	冬季地道风升温工况分析	72
§ 8-2	冬季地道风升温过程在 $i-d$ 图上的表示	73
第三章	地道风降温的应用	77
第一节	地道风降温的使用条件及对地道的要求	77
§ 1-1	地道风降温的使用条件	77
§ 1-2	对地道的要求	80
第二节	地道风降温的应用效果	82
第三节	地道风降温工程中建筑物冷负荷的计算特点	90
§ 3-1	室外空气计算温湿度的确定	91
§ 3-2	气流组织对冷负荷计算的影响	91
§ 3-3	室内散热量的计算特点	92
§ 3-4	围护结构传热量的计算特点	95

第四节	地道风降温工程的气流组织特点	96
§ 4-1	气流组织方式的选择	96
§ 4-2	侧向百页送风口的射流送风计算	97
§ 4-3	散流器顶送计算	108
§ 4-4	排风口的设置	110
§ 4-5	地道风降温工程中常用的气流组织方式举例	111
第五节	通风机房的设置及风机选择	117
§ 5-1	通风机房的设置	117
§ 5-2	风机的选择	119
第六节	冬季地道风升温系统中二次空气加热器的计算与选择	122
§ 6-1	冬季建筑物热负荷的计算特点	122
§ 6-2	冬季建筑物送风量的确定	124
§ 6-3	空气加热器的计算与选择	125
第七节	地道风降温工程设计计算程序	132
第四章	工程实例及地道试验	135
第一节	地道风降温工程实例介绍	135
第二节	地道试验	149
§ 2-1	试验用地道的情况	149
§ 2-2	试验项目及测试仪表	151
§ 2-3	试验数据	151

参考文献

附 录

全国主要城市地面温度及温度波幅

附 图

湿空气焓湿图 (大气压 $\frac{1013.25\text{mbar}}{760\text{mmHg}}$)

绪 论

地道风降温是近十几年来在我国发展起来的一门新技术。由于系统简单、节省能量和造价低廉而引起人们的重视。

随着地下构筑物的增多，人们在实践中进一步认识到了地层对自然的冷、热能量的储存作用，并试图去利用它。地道风降温就是指利用地道冷却空气，然后送至地面上的建筑物，达到降温目的的一种专门技术。它包括空气通过地道时的冷却和送至建筑物进行降温两部分。前者是空气与地道进行换热，后者则是建筑物与空气换热。由于地层的体积庞大，使其具有无可比拟的、巨大的吸热或放热能力。从一定意义上讲，可谓一个取之不尽的能量源泉。尽管在利用的手段上，还因技术的发展水平而受到一定的限制。而后一部分问题，也由于地层温度的变化特点而使建筑物的冷负荷及通风系统的计算具有自己的特点，不能简单地沿袭空气调节工程所用的全部计算方法。因此，研究空气通过地道时的冷却（或加热）过程，并采用合理的计算方法，以及研究地层温度的变化特性和建筑物降温工程计算的特点，就是本书的主要目的。

地道风降温在我国自七十年代初期迅速发展起来。先是用于人员集中、并急待降温的公共建筑，如影剧院、礼堂等，以后逐步发展到招待所、办公楼以及工业建筑物的降温

通风，如印刷厂、纺织厂、电子及机械工厂的热车间及其他工业厂房。就地区而言，先是在黄河下游附近的地区采用。因为这一地带夏季比较炎热，但全年平均气温较低，地层温度较低，具有利用地道风降温的有利条件。以后就逐步推广到长江流域及南方地区，以及西北、东北等寒冷地区。实践证明，不同地区采用不同的计算条件与技术措施后，都可以取得理想的降温效果。特别在北方寒冷地区，由于地层温度很低，可以使空气冷却到较低的温度，这就有可能对空气再进行湿度处理，可以提高建筑物的空气调节等级。目前，地道风降温已在我国广大地区推广应用，并得到很大的发展。

地道风降温工程的造价，在利用已有地道冷却空气时，由于地道本身的投资不包括在通风工程造价之内，与人工制冷及深井水降温工程比较，有较大的节省。较多数情况而言，仅空气处理部分，可比氨制冷系统节省投资70%以上；与深井水降温相比，亦可节省造价60%以上。同时还可节省电能70%左右。一般说来，每处理10000m³/h的空气，只需投资2000元左右。它的经济效果和节能效果是非常显著的。在无现成的地道可利用的情况下，如果建造专供空气冷却用的简易地道，由于地道的构造不考虑其他用途，就可以做得非常简单，并且应根据换热的要求来决定其尺寸、几何形状及埋设深度。其造价要比建造供防空或其他用途的地道低廉得多。这样，降温工程的总投资，接近于人工制冷系统的造价，但是电力和维护费用的节省以及对周围环境无污染等优点，仍是采用其他制冷方式所无法比拟的。我国幅员广大，不少地方不仅有大量的地道可利用，并且有不少的山洞、隧道、暗河等天然或人工通道可以利用。因此，地道风降温技术，不仅在现阶段有实际意义，即使在我国的经济发展到一

定水平以后，这一天然冷（热）源的利用，也仍然会受到人们应有的重视。

地道风降温是利用地能的一种形式，虽然首先从应用于降温开始，但必然会发展到用于升温，即在冬季利用地道来加热空气。尽管由于地层温度的限制，空气在流经地道后，不能达到直接送入室内进行采暖的要求温度，但是作为第一级预热，仍然有很大的节能效果。对于非采暖地区或过渡地区，冬季气温亦较低，但建筑物内无采暖设备，卫生条件较差。如果利用地道风，在建筑物内无人时提前通风预热，使建筑物内空气温度达到 10°C 以上，这对人的工作及活动条件会有很大的改善。这样，我们就可以根据地层对大气的冷、热能的蓄存作用，以空气为工作介质，使之在夏季利用地层作冷源（地层温度低于室外空气温度），而在冬季则利用地层作热源（加热空气），最大限度地利用自然能源，改善建筑物内的环境条件，减少人工能源的消耗。

本书主要包括地道风降温的计算及地道风降温的应用两大部分。除对空气流经地道时与地道的换热原理、地层温度的变化与计算、地道风降温工程的设计及应用特点等方面进行了论述外，并对实际工程设计及应用中的一些问题进行了探讨，力图从实际需要出发，满足工程计算与设计的需要，以促进地道风降温技术的发展。

第一章 地层温度的变化与计算

第一节 地层原始温度的变化特点

地层的原始温度，有深层和浅层的区别。地道风降温工程所用的地道多属浅埋地下构筑物。浅地层原始温度的变化，主要取决于地层表面温度的变化。而地层表面温度的变化，就平原地区而言，是由于太阳辐射及长波辐射散热所致，大气温度亦因此而相应变化。气象资料表明，大气及地面

温度的变化，均为周期性的温度波动，并且均可以一定的余弦函数表示。

由于地层的蓄热作用，温度波在向地层深处传递时，不仅造成温度波的衰减，并且相对地面温度波而言，还有时间的延迟。在地道风降温工程的设计与计算中，不仅需要知道温度波的衰减幅度，并且需要知道某一计算时刻的地层温度数值，还要知道温度波的时间延

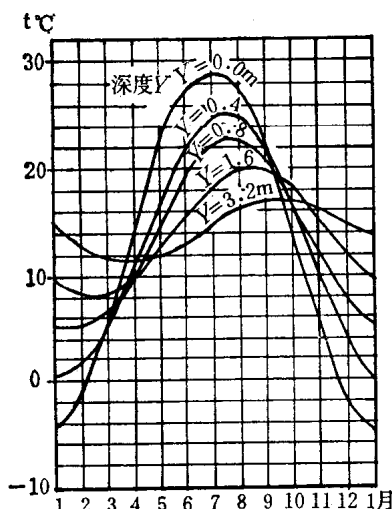


图 1-1 某市不同深度地层的实测地温变化图

迟情况，以便更好地利用地层原始温度的变化，使在夏季取得最低的冷却温度（最佳冷却效果），在冬季则取得最好的加热效果。

图1-1为某市不同深度地层实测的地层原始温度变化曲线。从图中可以看出，不仅随着地层深度的增加，温度波的波幅衰减越大（即波幅越小），并且温度波的峰值（极高、极低值）也随着地层深度的变化而延迟出现。但是，现有的气象资料，只有3.20m以内的地层原始温度实测数值，再无更深一些地层的温度数值，而一般地道的埋设深度，多在4.0m以下。因此，对3.20m以下地层的原始温度，需通过计算求得。

第二节 地层原始温度的计算公式

地壳可以认为是一个半无限大的物体。它在周期性温度波作用下的温度场，可以根据傅里叶导热微分方程而求得，即

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \quad (1-1)$$

式中， θ 为过剩温度（°C），如任意瞬间地层内任意点的温度为 $t_{(y, \tau)}$ ，而全年地面平均温度为 t_d ， t_d 为最热月和最冷月地面温度的平均值， $t_d = \frac{1}{2}(t_{p(\tau)} + t_{p(1)})^\circ\text{C}$ 。则

$$\theta_{(y, \tau)} = t_{(y, \tau)} - t_d \quad ^\circ\text{C}$$

由于地层表面温度是与大气温度同步变化，也是作余弦函数波动。因此，一类边界条件为：

$$\theta_{v, \tau} = A_d \cos \frac{2\pi}{Z} \tau \quad ^\circ\text{C} \quad (1-2)$$

式中 $\theta_{p,\tau}$ ——地表面任意瞬间的过余温度 ($^{\circ}\text{C}$)；

A_d ——地面温度波动振幅 ($^{\circ}\text{C}$)；

$$A_d = t_{p(\tau)} - t_d \quad ^{\circ}\text{C};$$

$t_{p(\tau)}$ 为最热月七月份的地面平均温度 ($^{\circ}\text{C}$)；

Z ——温度波的波动周期 (h)， $\frac{2\pi}{Z} = \Omega$ ，称为温度波的波动频率 (rad/h)。

因此，对公式 (1-1) 进行积分求解，最后可得地层(半无限大物体)在周期性热作用下的温度场，按下式表述：

$$\theta_{(y,\tau)} = A_d e^{-y\sqrt{\frac{\pi}{aZ}}} \cos\left(\frac{2\pi}{Z}\tau - y\sqrt{\frac{\pi}{aZ}}\right) \quad (1-3a)$$

若以波动频率 $\Omega = \frac{2\pi}{Z}$ 代入式 (1-3a)，则得

$$\theta_{(y,\tau)} = A_d e^{-y\sqrt{\frac{\Omega}{2a}}} \cos\left(\Omega\tau - y\sqrt{\frac{\Omega}{2a}}\right) \quad (1-3b)$$

由于 $\theta_{(y,\tau)}$ 为地层某一深度在某一瞬间的过余温度数值，所以

$$\theta_{(y,\tau)} = t_{(y,\tau)} - t_d \quad ^{\circ}\text{C}$$

因此，公式 (1-3b) 可以改写为地层内任一点、任一瞬间的原始温度 $t_{(y,\tau)}$ 的统一表达式。这就是我们在地道风降温工程中计算地层原始温度所用的计算公式。为了书写的方便，以 t_0 代表 $t_{(y,\tau)}$ ，则式 (1-3b) 可改写为：

$$t_0 = t_d + A_d e^{-y\sqrt{\frac{\Omega}{2a}}} \cos\left(\Omega\tau - y\sqrt{\frac{\Omega}{2a}}\right) \quad (1-3c)$$

式中 t_0 ——地层某一深度在某一时刻的原始温度 ($^{\circ}\text{C}$) ;

A_d ——地层表面温度波幅 ($^{\circ}\text{C}$) ;

t_d ——地层表面年平均温度 ($^{\circ}\text{C}$) ;

a ——地层材料的导温系数 (m^2/h) ,

$$a = \frac{\lambda}{\gamma c} ;$$

λ ——地层材料的导热系数 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \text{ h } ^{\circ}\text{C}$) ;

γ ——地层材料的比重 (kg/m^3) ;

c ——地层材料的比热 ($\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$) ;

Z ——温度波的波动周期 (h) ,

$$Z = 365 \times 24 = 8760 (\text{h}) ;$$

Ω ——温度波的波动频率 (rad/h) ;

$$\Omega = \frac{2\pi}{Z} = \frac{2\pi}{8760} = 0.000717 \text{ rad/h}.$$

第三节 地层原始温度的衰减

由于地层 (土壤或岩石) 对温度波的阻尼作用, 使温度波的振幅随地层深度 y 的增加而减小。若以 ν 表示其衰减程度, 则

$$\nu = \frac{\text{地面温度波幅}}{\text{任意点 } y \text{ 处的温度波幅}} = \frac{A_d}{A_y}$$

从公式 (1-3c) 可以看出, 当 $\cos\left(\Omega\tau - y\sqrt{\frac{\Omega}{2a}}\right) = 1$ 时, 可以得到 y 处的最大过剩温度, 即 y 处的温度波幅 A_y 。所以

$$A_y = A_d e^{-y\sqrt{\frac{\Omega}{2a}}} \quad ^{\circ}\text{C} \quad (1-4)$$

$$\text{衰减度 } \nu = \frac{A_d}{A_y} = \frac{A_d}{A_d e^{-y\sqrt{\frac{\Omega}{2a}}}} = e^{y\sqrt{\frac{\Omega}{2a}}}$$

显然，可以根据衰减度 ν 算出 y 点（即任意点）地层原始温度的最高及最低值。从而可以决定地层某一深处（即我们想利用的地道的中点埋深） y 处的温度波动区间。

y 点地层原始温度的最高值为：

$$t_{y(max)} = t_d + A_d e^{-y\sqrt{\frac{\rho}{2\alpha}}} \quad ^\circ\text{C} \quad (1-5a)$$

y 点地层原始温度的最低值为：

$$t_{y(min)} = t_d - A_d e^{-y\sqrt{\frac{\rho}{2\alpha}}} \quad ^\circ\text{C} \quad (1-5b)$$

从公式（1-4）中可以看出，当地层深度 y 值增加后，其温度波幅逐渐减小。通过实例计算可以看出，对土壤地层，当 $y = 15\text{m}$ 时，其温度波幅数值，已经减小到一般工程计算中可以忽略不计的程度，故称为等温层。不过等温层的深度会因地层材料的不同而变化。但为了计算及叙述的方便，一般均以 15m 作为等温层的分界线， y 小于 15m 的地层称为浅层， y 大于 15m 的地层即称为深层。在浅层地层中，不同深度的地层原始温度随时间而变化；而深层地层的原始温度则认为不随时间变化，但受地心热力的影响，按每 30m 增加 1°C 的梯度递增。

以上所述，只是以年温度波动为基础进行计算。除了年温度波动的影响之外，还有日温度波动的影响。但是由于日温度波动的周期很短，仅为 24 小时，且温度波的波幅较小，一般为年温度波幅的 $1/3$ 左右，所以它的影响深度只有 1.5m 左右。当深度大于 1.5m 以后，日温度波动的影响，基本上可以忽略不计。地道风降温工程所用的地道，埋深一般均大于此数，因此可以不考虑日温度波动的影响。

在浅地层原始温度的计算中忽略日温度波动及地热的影响，可以使计算简化。同时也由于这两项因素的影响甚微，

也是工程计算中可以允许的。

从某市的地层原始温度的实际计算中，可以进一步看出温度波的衰减情况。某市的地层材料为中等湿度的土壤，其导温系数 $a=0.00318\text{m}^2/\text{h}$ ；地层表面年平均温度 $t_a=16^\circ\text{C}$ ；地层表面年温度波幅 $A_a=16.8^\circ\text{C}$ ；其不同深度地层原始温度变化见表1-1。

某市不同深度地层原始温度变化

表 1-1

地 层 深 度 $y(\text{m})$		0.5	1.0	2.0	3.0	4.5	6.0
地层温度波幅 $A_y(^{\circ}\text{C})$		14.23	12.15	8.70	6.25	3.81	2.32
地层原 始温度 ($^{\circ}\text{C}$)	最 高 $t_{y(\max)}$	31.03	28.95	25.50	23.05	20.61	19.12
	最 低 $t_{y(\min)}$	2.57	4.65	8.10	10.55	12.99	14.48

地 层 深 度 $y(\text{m})$		8.0	9.5	12.0	14.0	15.0
地层温度波幅 $A_y(^{\circ}\text{C})$		1.525	0.731	0.327	0.152	0.116
地层原 始温度 ($^{\circ}\text{C}$)	最 高 $t_{y(\max)}$	18.32	17.53	17.14	16.95	16.91
	最 低 $t_{y(\min)}$	15.275	16.069	16.473	16.648	16.684

从表1-1可以看出，当 $y=15\text{m}$ 时其温度波幅 $A_y=0.116^\circ\text{C}$ ，基本可认为是等温层了。

从地层原始温度 t_0 的计算式(1-3c)中可以看出，影响温度波衰减的主要因素是地层材料的导温系数 a 和波动周期 Z 。温度波的波动周期越长，则温度波的穿透本领越大。显

然，年波动周期比日波动周期长数百倍，其影响当然有很大差别。但当波动周期相同，均为年波动周期时，影响温度波衰减的主要因素就是材料的导温系数 a 。如地层为岩石， a 值较大，则温度波影响深入，衰减慢；但若为干燥土壤， a 值较小，则温度波影响较差，衰减较快。因此，对同一地区而言，尽管气象条件相同，地层深度相同（ y 值相等），但因不同地点的地层材料不同，却会出现不同的地层原始温度。

以上主要指出了地层某一深度在一年中的温度变化幅度，对地道风降温工程而言，尚需求得在某一时刻的具体数值。详见第五节。

第四节 温度波的时间延迟

对于温度波的时间延迟，我们在实际生活中已有不少体验。如室外空气温度对室内空气温度的影响，会因建筑物围护结构的材质和构造不同，而有不同的延迟影响时间。地面温度波对地层深处温度的影响，也因地层深度的不同而有不同的延迟影响时间。在地道风降温工程中，由于使用地道的时间是地面温度波出现最高值的时间，即最热月。而在某一深度处的地道周围的地层温度，却因地面温度波的时间延迟，并不处于这一深度温度波的最高值，可能会随着深度的不同而处于极低值或较低数值。这对于利用地道来冷却空气恰恰是非常有利的。例如，当最热月七月份，室外空气温度及地层表面温度已达全年的最高值，而在一定的深度范围内（ $\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{3}{2}\pi$ ， θ 为相角），地层原始温度的数值恰恰